

Monitorización tridimensional del sistema playa-duna del norte de Cullera (Valencia) mediante fotografías aéreas

Jaime Almonacid-Caballer⁽¹⁾, Denys Gorkovchuk⁽¹⁾, Jesús Palomar-Vázquez⁽¹⁾, Carlos Cabezas-Rabadán^(1,2), Josep E. Pardo-Pascual⁽¹⁾

⁽¹⁾ Grup de Cartografia GeoAmbiental i Teledetecció, Dept. d'Enginyeria Cartogràfica, Geodesia i Fotogrametria, Universitat Politècnica de València. Camí de Vera, s/n. 46022 València. España. jaialca@upv.es

⁽²⁾ Université de Bordeaux, CNRS, Bordeaux INP, EPOC, UMR 5805, F-33600 Pessac, France.

Resumen: La cuantificación de los cambios volumétricos en los sistemas playa-duna resulta clave para poder hacer balances sedimentarios dentro de las células sedimentarias costeras y tener una comprensión completa de la evolución experimentada por las playas. Este estudio analiza la potencialidad que las series de fotografías aéreas tomadas para generar ortofotos tienen para monitorizar los cambios volumétricos en playas y dunas. El trabajo demuestra la obtención de 6 MDS (Modelo Digital de Superficies) de la costa valenciana entre 2017 y 2022, así como la posibilidad de caracterizar el sistema dunar y la playa emergida. Su evaluación muestra que se alcanza una exactitud altimétrica elevada, de magnitud similar a la que se puede obtener de un vuelo LiDAR. Empleando los MDS de 2019 y 2020 se ha realizado un análisis preliminar de los cambios en el sector costero al norte de Cullera (Valencia). Los resultados muestran que la cuantificación de los cambios experimentados por estas unidades costeras a lo largo del tiempo permite analizar la respuesta a temporales desde un enfoque más holístico que las mediciones bidimensionales, siendo un complemento interesante a otras fuentes de información morfológica.

Palabras clave: monitorización costera 3D, erosión dunar, fotogrametría, geomorfología costera, modelos digitales de elevaciones.

Three-dimensional monitoring of the dunes and the beach in the north of Cullera (Valencia) using aerial photographs

Abstract: *The quantification of volumetric changes in beach-dune systems is key to analyse the sedimentary budget of coastal cells and to have a complete understanding of the evolution experienced by beaches. This study analyses the potential of the series of aerial photographs originally acquired to generate orthophotos to monitor volumetric changes in beaches and dunes. The work demonstrates the obtention of 6 DSMs (Digital Surface Model) of the Valencian coast between 2017 and 2022, as well as characterising the dune system and the emerged beach. Its accuracy assessment shows that they present a high altimetric accuracy, with a similar magnitude to that which can be obtained from a LiDAR flight. A preliminary analysis of the volumetric beach changes in the coastal sector north of Cullera (Valencia) has been carried out using the DSM of 2019 and 2020. The results show how the quantification of the volumetric changes experienced by both coastal units over time allows us to analyse the response to storms from a more holistic approach than two-dimensional measurements, being an interesting complement to other sources of morphological information.*

Keywords: 3D coastal monitoring, foredune erosion, photogrammetry, coastal geomorphology, digital elevation models.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas playa-duna presentan una morfología altamente dinámica al ser elementos estrechamente interrelacionados (Hesp, 1988, Short y Hesp, 1982). Las dunas crecen a partir de arena acumulada en la playa emergida, mientras que pueden devolver el sedimento a esta última tras los temporales costeros, jugando un papel esencial en la recuperación de la playa y la evolución de las costas (Psuty y Silveira, 2010) Es por ello que resulta sumamente útil realizar análisis que permitan cuantificar las variaciones en el volumen de sedimentos tanto de la playa emergida como de la primera alineación dunar.

La cuantificación de los cambios volumétricos es crucial para calcular balances sedimentarios dentro de las células sedimentarias costeras (Eamer y Walker, 2013). Esta información es fundamental para la gestión integral y

evaluación de intervenciones humanas destinadas a garantizar la sostenibilidad física de las playas.

Muchos de los estudios evolutivos en playas se centran en los cambios en la línea de costa, pero esa es sólo una aproximación bidimensional. Los estudios 3D son mucho menos habituales dado que los procesos para deducir la altimetría son más complejos y caros. En los últimos años, se ha producido una eclosión de estudios de evolución 3D de playas y dunas basados en levantamientos con UAV empleando tanto datos de LiDAR como de fotogrametría (e.g., Guisado-Pintado *et al.*, 2019; Pagán *et al.*, 2019). Este tipo de estudios suele tener un carácter local y puntual en el tiempo lo que limita su uso generalizado y en amplios territorios, requisitos clave para la adecuada gestión de estas zonas costeras.

En muchos centros cartográficos de países desarrollados, la actualización periódica de ortofotografías es una

práctica común. Esta labor generalmente implica dos etapas: la orientación de los fotogramas, y su proyección sobre un modelo digital de superficies (MDS). En fotogrametría, a partir de los fotogramas orientados, es posible obtener información 3D en forma de nube de puntos o modelos. Aunque la proyección de las imágenes sobre un MDS derivado del propio vuelo produce lo que se conoce como una ortofoto verdadera (*true ortofoto*), los centros cartográficos no suelen adoptar esta metodología debido a la complejidad del filtrado, preprocesado y preparación del MDS fotogramétrico. En cambio, prefieren emplear un MDS ajeno al vuelo fotogramétrico. En consecuencia, la información 3D inherente a un vuelo fotogramétrico queda a menudo desaprovechada (Grottoli *et al.*, 2021).

Estas fotografías podrían ser en una fuente documental crucial para monitorizar tridimensionalmente ambientes dinámicos como son los sistemas playa-duna. Esto se lograría mediante la confirmación de la eficiencia y precisión de los procesos de extracción de datos altimétricos, junto con la propuesta de una metodología para sistematizar la magnitud y el sentido de los cambios.

En este estudio, se analiza el potencial de las series fotográficas aéreas con el fin de monitorizar los cambios volumétricos en playas y dunas. Así, se han obtenido 6 MDS a partir de las fotografías aéreas del ICV entre los años 2017 a 2022. Para todos los años analizados, se evaluará su precisión y se propondrá, para los años 2019 y 2020, una metodología para analizar los cambios en la playa y la duna.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Para obtener la información tridimensional, se necesitan fotografías con suficiente solape para su orientación relativa, y puntos de control (GCPs, por sus siglas en inglés) para su georreferenciación. Las fotografías aéreas suministradas por el ICV cumplen con un solapamiento longitudinal mayor al 60% y aproximadamente del 30% en sentido transversal entre las pasadas de vuelo. Los GCPs se obtienen aprovechando las ortofotografías anuales del ICV (generadas con los mismos fotogramas que se pretenden reprocesar. Al cargar estas ortofotografías en un Sistema de Información Geográfica, se seleccionan visualmente puntos invariables en el tiempo. La cota de esos puntos se obtiene de un MDS generado a partir de los datos LiDAR de la zona asociados al Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) adquirido en 2015. El proceso fotogramétrico posterior se realiza con la herramienta *Metashape Photoscan*.

El proceso fotogramétrico abarca desde el enmascaramiento de las zonas acuáticas hasta la orientación de las imágenes y su georreferenciación mediante GCPs. Internamente, se genera un mapa de profundidades para cada fotografía. Con la orientación de las imágenes y el mapa de profundidades, se exporta directamente un MDS en que a cada píxel se asocia la cota máxima de los mapas de profundidad que proyectan sobre él. El resultado es un MDS anual de 1 m/píxel. Es importante remarcar que los resultados únicamente serán correctos fuera del mar ya que el agua se mueve entre dos tomas fotográficas y no es posible encontrar puntos homólogos válidos. Por ello, en los MDS

resultantes se ha de enmascarar la zona marina y a esos píxeles, en todo caso, se les dará el valor de cota cero.

Con los cerca de 14000 fotogramas procesados (Tabla 1), se han obtenido 6 MDS anuales entre 2017 y 2022 que abarcan toda la costa y parte de los tramos interiores de los cursos fluviales de la Comunidad Valenciana.

Tabla 1. Número de fotogramas empleado en la confección de cada uno de los MDS.

Año	Nº fotogramas
2017	2418
2018	2264
2019	2271
2020	2498
2021	2297
2022	2249

La calidad métrica de los MDS se evalúa mediante dos enfoques. Primero, se examina el residuo de los propios GCPs tras el ajuste de la orientación fotogramétrica. Segundo, se propone una metodología independiente del propio proceso fotogramétrico, localizando los ejes viarios estables en este periodo y obteniendo un punto cada 5 m. se mide la cota de estos puntos en el MDS del LiDAR 2015 y en los MDS fotogramétricos generados (entre 2017 y 2022). La discrepancia entre las altitudes de 2015 y de los MDS fotogramétricos se considera una medida de error. Los resultados se analizan cuidadosamente para excluir las zonas con cambios, vegetación o edificaciones cercanas que puedan contaminar los datos. Esta metodología proporciona más puntos que el número de GCPs empleados en el ajuste, tiene mayor densidad espacial y permite realizar análisis geográficos de la distribución de errores.

El aprovechamiento de esta información es un objeto de estudio abierto y que deberá adaptarse a cada circunstancia, incluido el análisis de los cambios y evolución de playas y dunas. En este caso, se propone seleccionar un año como referencia y evaluar las alteraciones en playas y dunas respecto a ese año en tramos de 100 metros a lo largo de la costa. Se comparará el año 2020 con respecto a 2019 (año de referencia) en un pequeño tramo de costa de 4 km al norte del cabo de Cullera. Empleando el MDS y la ortofotografía de referencia, de 2019, se han fotointerpretado manualmente los espacios de duna y playa emergida por separado. La superficie dunar abarca desde un borde interior de análisis hasta el pie de duna. La línea interior asegura que todos los cambios de duna quedan analizados. El pie de duna se interpreta como el cambio de entre la planicie de la playa y la curvatura que da inicio a la duna. El espacio de playa emergida abarca desde el pie de duna hasta la línea de agua más mar adentro de toda la serie temporal. La división de dichos polígonos de duna/playa en los tramos de análisis da lugar a las unidades de análisis. De cada uno de estos polígonos, se extraen los estadísticos zonales para caracterizar su elevación (cota media y suma total) de los MDS de 2019 y 2020. Finalmente, se analiza la diferencia de cota media y volumen para cada unidad de análisis entre los dos años.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Evaluación métrica de los modelos

Seguindo la metodología descrita, la primera medida de error viene definida por los residuos de ajuste fotogramétrico en los GCP. En la Tabla 2 se presentan las desviaciones típicas de estos residuos –usando todos los GCPs– en cada una de las seis series usadas.

Tabla 2. Desviaciones típicas de los puntos de control en los proyectos fotogramétricos (valores en metros).

Año	Desv. est. XY (m)	Desv. est. Z (m)
2017	0.282	0.378
2018	0.244	0.317
2019	0.278	0.348
2020	0.241	0.284
2021	0.250	0.287
2022	0.241	0.284

Como se puede apreciar en la Tabla 2, los errores en planimetría son todos inferiores a 0.28 m y en altimetría la gran mayoría son inferiores a 0.35 m, siendo algo más alto el de 2017, justo la serie en la que los fotogramas presentan un menor solape entre ellos.

La segunda evaluación de errores descrita en la metodología hace uso de la comparación entre los MDS fotogramétricos obtenidos y el MDS LiDAR de 2015 sobre los viales del territorio. En este caso se ha evaluado únicamente la precisión altimétrica en el tramo costero entre Valencia y Cullera, el cual incluye usado 69 857 puntos (Tabla 3).

Como se puede apreciar, los valores de error en altimetría son ligeramente menores a los deducidos a partir de los puntos de control. Los sesgos siempre se sitúan por debajo de 0.13 m, sólo superando los 0.082 m en dos casos. Todas las desviaciones son inferiores a 0.25 m, lo que sugiere que esta magnitud de error es comparable a las precisiones nominales de los puntos LiDAR. Por tanto, se entiende que los MDS obtenidos pueden usarse para el análisis de cambios con igual fiabilidad que los datos LiDAR.

Tabla 3. Estadísticos básicos de control de errores evaluados (en metros) en el tramo costero Valencia- Cullera.

Año	Sesgo	Desv. est.	RMSE
2017	-0.002	0.254	0.254
2018	0.130	0.220	0.256
2019	0.082	0.238	0.252
2020	0.118	0.215	0.245
2021	0.080	0.218	0.232
2022	0.055	0.223	0.230

3.2. Caracterización de cambios tridimensionales de playa y dunas

El análisis compara la altitud media y el volumen en los espacios de duna y playa a lo largo de 4km de costa dividida en tramos de 100 m de longitud. Los vuelos de 2019 y 2020 de los que se derivan los respectivos MDS fueron realizados en verano. En enero de 2020 tuvo lugar el temporal Gloria, el de mayor magnitud registrada en la costa mediterránea española y que produjo una fortísima erosión en las playas y dunas de sector (Pardo-Pascual

et al., 2021, 2022). Es, por tanto, coherente que todos los cambios detectados sean negativos.

Los resultados muestran que globalmente se han perdido 157264 m³ de arena y el terreno ha descendido 60 cm. Las pérdidas han sido mayores en la playa, donde se ha registrado un descenso medio de 67 cm mientras que en las dunas ha sido de 53 cm.

En la Figura 1 se muestra la distribución de las pérdidas en las dunas y en la playa, pudiéndose reconocer la desigual distribución geográfica de los procesos de cambio.

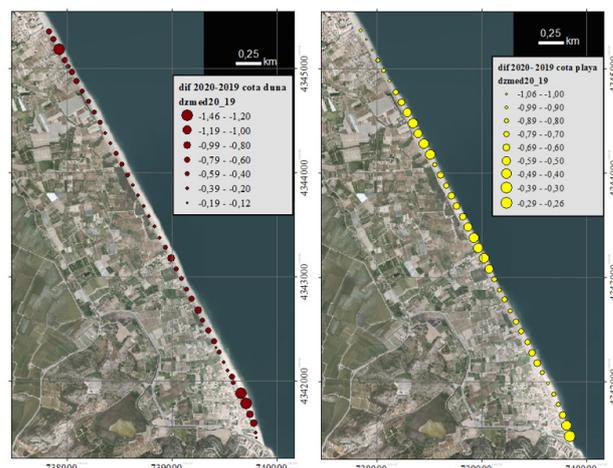


Figura 1. Cambios en la cota de la duna (izquierda) y de la playa (derecha) entre 2020 y 2021.

Los descensos más pronunciados del frente dunar se han producido en los extremos de la zona de estudio. En contraste, en la playa emergida se observa un marcado descenso en un segmento de la mitad norte y en el extremo sur (un pequeño sector sin dunas).

La cuantificación del cambio volumétrico en ambos entornos (Figura 2) muestra un claro dominio de las pérdidas debido sobre todo al impacto del temporal Gloria. En la parte norte (primeros 600 m de la zona de estudio) las pérdidas fueron máximas en la playa y la duna (aunque menores). Entre los 750 m y los 3000 m, el volumen de arena perdido en playa y duna fue similar. Entre 3000 y 3500 m, la duna se vio poco afectada mientras la playa sufrió fuertes pérdidas. Finalmente, en el extremo sur aparece un punto con fuerte erosión en playa y duna que contrasta con el muy escaso cambio de junto al cabo de Cullera.

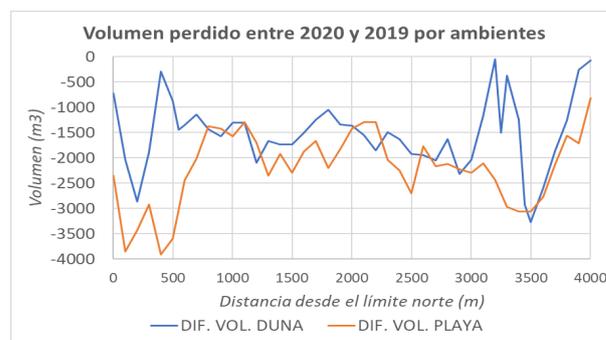


Figura 2. Balance local del volumen de arena en las dunas y playa de la zona estudiada.

4. CONCLUSIONES

Se ha demostrado la viabilidad de las fotografías aéreas, adquiridas en principio para la generación de ortofotografías, para derivar información tridimensional precisa. Se ha mostrado un caso particular de uso potencial en el empleo de cambios volumétricos en dunas y playas.

Se ha verificado que la precisión altimétrica es comparable a la que se puede obtener de un vuelo LiDAR.

Para ejemplificar la potencial utilidad de los resultados, se ha presentado un caso de aprovechamiento de los MDS obtenidos. Se ha presentado una metodología para analizar los cambios en playas y dunas (potencialmente exportable a zonas más amplias) para caracterizar los cambios volumétricos en un sector de costa. En estos espacios, esta información 3D aporta un enfoque más integral y puede ser un complemento extremadamente valioso para completar las mediciones bidimensionales habituales, como las líneas de costa.

5. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución al subproyecto SIMONPLA integrado dentro de programa ThinkinAzul apoyado por el Ministerio de Ciencia e Innovación con fondos de la Unión Europea NextGeneration EU (PR-TR-c17.I1) y por la Generalitat Valenciana, con el apoyo del contrato M. Salas (Programa de Recualificación) del Ministerio de Universidades financiado por la UE – NextGenerationEU y la ayuda Primeros Proyectos Investigación (PAID-06-22) Vicerrectorado Investigación de la Universitat Politècnica de València.

Agradecemos al Institut Cartogràfic Valencià (ICV) el habernos proporcionado los fotogramas y la documentación auxiliar de los vuelos para la realización de este proyecto.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Eamer, J.B., Walker, I.J. (2013). Quantifying spatial and temporal trends in beach–dune volumetric changes using spatial statistics. *Geomorphology*, 191, 94-108. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.03.005>
- Grottoli, E., Biauxque, M., Rogers, D., Jackson, D.W., Cooper, J.A.G. (2020). Structure-from-motion-derived digital surface models from historical aerial photographs: A new 3D application for coastal dune monitoring. *Remote Sensing*, 13(1), 95. <https://doi.org/10.3390/rs13010095>
- Guisado-Pintado, E., Jackson, D.W., Rogers, D. (2019). 3D mapping efficacy of a drone and terrestrial laser scanner over a temperate beach-dune zone. *Geomorphology*, 328, 157-172. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.12.013>
- Hesp, P. (1988). Surfzone, beach, and foredune interactions on the Australian South East Coast. *Journal of Coastal Research*, 15-25.
- Pagán, J.I., Bañón, L., López, I., Bañón, C., Aragonés, L. (2019). Monitoring the dune-beach system of Guardamar del Segura (Spain) using UAV, SfM and GIS techniques. *Science of the total environment*, 687, 1034-1045. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.186>

Pardo-Pascual, J.E., Cabezas-Rabadán, C., Palomar-Vázquez, J. (2021). Anàlisi dels canvis morfològics del cordó dunar i les platges de la devesa del Saler a conseqüència del temporal Glòria. In *A Vicenç M. Rosselló, geògraf, als seus 90 anys* (pp. 393-418). Universitat de València.

Pardo-Pascual, J.E., Palomar-Vázquez, J., Cabezas-Rabadán, C. (2022). Estudio de los cambios de posición de la línea de costa en las playas del segmento València-Cullera (1984-2020) a partir de imágenes de satélite de resolución media de libre acceso. *Cuadernos de Geografía de la Universitat de València (Online)*, 108(1), 79-104. <https://doi.org/10.7203/CGUV.108-9.23828>

Psuty, N.P., Silveira, T.M. (2010). Global climate change: an opportunity for coastal dunes?? *Journal of Coastal Conservation*, 14(2), 153-160. <https://doi.org/10.1007/s11852-010-0089-0>

Short, A.D., Hesp, P.A. (1982). Wave, beach and dune interactions in southeastern Australia. *Marine geology*, 48(3-4), 259-284. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(82\)90100-1](https://doi.org/10.1016/0025-3227(82)90100-1)